第39卷　第6期
2022年11月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 6
Nov. 2022

甘肃省灰水足迹变化特征及驱动因素

尹明财，　朱　豪，　胡圆昭，　李振中，　张济世

（兰州交通大学环境与市政工程学院，甘肃 兰州　730070）

摘　要： 利用STIRPAT模型分析了灰水足迹的驱动因素，研究了甘肃省2011—2020年的灰水足迹变化。结果表明：在这10 a间灰水足迹整体下降，下降了378.53×10^8 m^3；最大降幅为81%。其中生活灰水足迹、农业灰水足迹、工业灰水足迹占比为43%、38%、19%。种植业灰水足迹大于畜牧业灰水足迹。灰水足迹强度整体出现下降趋势，说明水资源利用率逐年提高。从水污染程度和剩余灰水足迹来看，2011—2016年甘肃省水污染水平均大于1，水资源污染比较严重。剩余灰水足迹从2017—2020年呈现为负值，说明水质呈现上升的趋势，水环境问题得到改善，水资源持续性增加。从甘肃省灰水足迹的驱动因素来看，城镇化水平、人均GDP、第一、二、三产业产值、灰水足迹强度、社会消费品零售总额均会促进灰水足迹的增加，影响系数分别为0.142、0.126、0.052、0.382、0.132、0.916、0.1。根据影响系数的大小，可以去制定相关的政策，减少甘肃省的灰水足迹，从而减轻水环境压力。

关键词： 甘肃省；灰水足迹；驱动因素；STIRPAT模型；岭回归

水资源是我们生存所必需的，也是整个社会发展的重要支撑。目前，全球水资源的需求量越来越大，由于水环境的日益恶化[1]，人们对水资源的保护和有效利用也越来越重视[2]。甘肃省缺水较严重，2020年甘肃省水资源总量为410.88×10^8 m^3，2011年的水资源量为272.15×10^8 m^3，较2011年增长了51%。由于水资源的供需不平衡，全省缺水量为10.88×10^8 m^3，缺水程度为9.0%。2020全省污水排放总量为6.97×10^8 t，较2011年增长了18%[3]。水资源短缺在很大程度上限制着甘肃省的发展，随着经济的发展对水资源的需求也越来越大。对于甘肃省水资源紧缺以及水污染的现状，首要任务是对水环境的质量进行提升。首先是水污染防治，对甘肃省的水环境污染程度进行量化分析和评价，水污染评价的方法大多用BP网络神经[4]、综合污染指数法[5]、模糊数学方法来评价[6]。但这些评价方法不能全面的描述水体污染与水资源两者的关系[7]。灰水足迹作为新型的水污染计算方法，本质上能很好地定量分析水质和水量之间的关系[8]，其优势在于在较大研究区域上能快速、直观地计算水污染对水资源影响的程度。

Hoekstra等[9]于2008年初次提出灰水足迹的定义，并根据水环境检测标准表示为将水污染物质稀释至无危害的淡水体积[10]。其研究的区域比较大，以省区和流域为主。主要从工业、农业、生活3个方面进行研究评价[11]。国内的一些学者进行了大量的灰水足迹研究，如申浩等[8]从灰水足迹的均衡性角度，对山东省的灰水足迹进行研究，研究表明灰水足迹强度和水环境压力地区差异性明显，其中生活灰水足迹出现了缓慢的增长，但总的灰水足迹呈下降趋势。从灰水足迹的均衡性指标来看，农业>生活>工业。傅春等[11]利用灰水足迹对江西省农田的碳磷进行时空分析，从时间尺度来看，2000—2020年间农田的氮磷灰水足迹变化为先增后减，氮肥灰水足迹变化幅度较平缓，磷肥灰水足迹变化幅度较大；磷肥大于氮肥灰水足迹；从空间尺度来看氮肥和磷肥的灰水足迹空间分布基本相同均是中北部较高，四周较低。罗勇[12]从经济和技术等角度对流域进行灰水足迹时空演变特征研究。近年来，灰水足迹的研究多为区域时空分析、均衡性以及流域的时空演变特征，研究区域以我国东部和南部地区较多，西北和干旱地区的灰水足迹的驱动因素研

收稿日期： 2022-04-20；　**修订日期：** 2022-08-21
基金项目： 国家自然科学基金重大项目(41690141)；国家自然科学基金面上项目(41671029)
作者简介： 尹明财(1995-)，男，硕士研究生，主要研究方向为水文水资源. E-mail: 1179017282@ qq.com
通讯作者： 张济世. E-mail: zhangjs@ mail.lzjtu.cn

究相对较少。故本文选取甘肃省为研究对象，甘肃省作为干旱地区，水资源一直比较匮乏，其水质的污染历来较严重，水资源的利用率也较低。研究其灰水足迹的变化以及驱动因素，不仅能充分的分析水量与水质之间的关系；而且对水资源高效利用、供水安全等提供依据，对甘肃省的经济和民生发展具有推动意义。

1 研究区概况

甘肃省地处我国西北部，地理位置为92°~109°E，32°~43°N，东西南北分别于陕西，青海（新疆）、四川、宁夏（内蒙古）接壤。属温带季风气候，气候干躁，降雨少。2020年全省平均降水量为317.6 mm。水资源主要有3大流域9个水系。截至2020年底，甘肃省常住人口0.25×10^8人，GDP为10243.3×10^8元，第一、二、三产业增加值分别为1364.7×10^8元、3466.6×10^8元、5412.0×10^8元。全年供水量为109.9×10^8 m^3，人均用水量为438.7 m^3·人$^{-1}$。其中，工业、农业、生活、生态用水量分别为6.2×10^8 m^3、83.7×10^8 m^3、9.3×10^8 m^3、10.7×10^8 m^3。

2 方法与数据来源

2.1 农业灰水足迹计算

农业灰水足迹分为种植业和养殖业灰水足迹来研究，以此来提高农业灰水足迹的准确性。

2.1.1 *种植业灰水足迹* 种植业最重要的污染物来自化肥。化肥分为氮肥、磷肥和钾肥。其中氮肥是用水量较大的肥料类型，所以选用氮肥来作为种植业灰水足迹[13]。但是氮肥不是全部均进入水体，化肥污染属于面污染源；要考虑氮肥的淋失率[14]，由于淋失率不是固定值，所以要考虑研究区域的地理条件、污染物类型、农作物类型等。其计算公式如下：

$$WF_{grey,plant}=\frac{L}{C_{max}-C_{nat}}=\frac{\alpha Appl}{C_{max}-C_{nat}} \quad (1)$$

式中：$WF_{grey,plant}$表示种植业灰水足迹(10^8 m^3)；α表示氮肥淋失率；Appl表示氮肥施用量(t)；C_{max}表示污染物在水体中的最大排放浓度(kg·m^{-3})；C_{nat}表示污染物在水中的自然浓度(kg·m^{-3})。

2.1.2 *养殖业灰水足迹* 选取猪、牛、羊和家禽的粪便用作污染[15]，利用粪便中的污染含量、流失率和养殖数量来计算。要求规定喂养期是一年的家畜，用年末存栏量，不够一年的用年末出栏量。粪便中的关键污染物是TN（总氮）和COD（化学需氧量），因此选择TN和COD两类污染用作养殖业灰水足迹的污染。选取TN和COD最大值为养殖业灰水足迹。其计算公式如下：

$$WF_{grey,live}=\frac{L}{C_{max}-C_{nat}} \quad (2)$$

$$WF_{grey,live}=MAX\{WF_{grey,live}(TN),WF_{grey,live}(COD)\} \quad (3)$$

式中：$WF_{grey,live}$为养殖业灰水足迹(10^8 m^3)；C_{max}分别表示TN或COD在水中的最大可排放浓度(kg·m^{-3})；C_{nat}为TN或COD在水中的自然浓度(kg·m^{-3})；L=每年畜禽个体(头/只)排泄粪便中污染物含量×粪便污染物进入水体流失率×年末出栏量/年末存栏量。

农业污染为面源污染，选取种植业和养殖业中COD或TN污染物足迹的最大值相加得到农业灰水足迹。农业灰水足迹的计算公式为：

$$GWF_{grey,agri}=MAX\{WF_{grey,live}(COD), WF_{grey,plant}(TN)+WF_{grey,live}(TN)\} \quad (4)$$

式中：$GWF_{grey,agri}$为农业灰水足迹(10^8 m^3)。

2.2 工业灰水足迹和生活灰水足迹

工业污染是一种点源污染，根据已知的文献参考得到工业灰水足迹由氨氮或COD的污染足迹的最大值构成[16]。其计算公式如下：

$$WF_{grey,ind}=\frac{L}{C_{max}-C_{nat}} \quad (5)$$

$$WF_{grey,ind}=MAX\{WF_{grey,ind}(N),WF_{grey,ind}(COD)\} \quad (6)$$

式中：$WF_{grey,ind}$表示工业灰水足迹(10^8 m^3)；C_{max}表示氨氮和COD污染物在水中的最大排放浓度(kg·m^{-3})；C_{nat}表示污染物的自然浓度(kg·m^{-3})；L为工业排放的氨氮和COD。

2.3 生活灰水足迹

生活灰水足迹也是一种点源污染物，生活废水中的污染物主要以COD和氨氮为主，计算公式如下：

$$WF_{grey,lif}=\frac{L}{C_{max}-C_{nat}} \quad (7)$$

$$WF_{grey,lif}=MAX\{WF_{grey,lif}(N),WF_{grey,lif}(COD)\} \quad (8)$$

式中：$WF_{grey,lif}$为生活灰水足迹(10^8 m^3)。

2.4 区域灰水足迹

区域灰水足迹等于农业灰水足迹、工业灰水足迹和生活灰水足迹之和。区域灰水足迹计算公式如下：

$$WF_{grey,area} = WF_{grey,lif} + WF_{grey,ind} + WF_{grey,agri} \quad (9)$$

式中：$WF_{grey,area}$ 为区域灰水足迹(10^8 m^3)。

2.5 灰水足迹强度

灰水足迹强度是指地区内灰水足迹占该区域的生产总值的比率，它可以作为水资源利用效率指标[17]，其数值越小，说明水资源利用效率越高。

$$GWFI = \frac{WF}{GDP} \quad (10)$$

式中：$GWFI$表示灰水足迹强度[m^3·(10^4元)$^{-1}$]；WF表示研究区域的灰水足迹(10^8 m^3)；GDP为该区域生产总值(10^8元)。

2.6 水污染程度

水污染程度也称为水生态压力指数，用灰水足迹与年内可利用水资源总量比例来表示。当水污染程度系数小于1时，水环境处于安全状态；大于1，处于危险状态；等于1时，处于平衡状态。其计算公式如下：

$$WPL = \frac{WF}{R} \quad (11)$$

式中：WPL表示研究区域内水污染程度；R表示该区域内年可用水资源总量(10^8 m^3)。

2.7 剩余灰水足迹

剩余灰水足迹是指研究区域内灰水足迹与地区水资源总量之差，评价研究区域内的水资源的可持续性。当年内尺度的灰水足迹大于水资源量，即二者之差为正值时，水污染较严重，表明当年有限的水资源不能将排放到水体中的污染物彻底稀释到国家排放标准。如果剩余灰水足迹一直增大，就出现水质下降的情况。反之为负值时，当年有限的水资源能将排放到水体中的污染物彻底稀释到国家排放标准。其公式为：

$$RGWF = WF - R \quad (12)$$

式中：$RGWF$ 为剩余灰水足迹(10^8 m^3)。

2.8 STIRPAT模型

STIRPAT模型是IPAT模型的扩展模型，IPAT模型是20世纪70年代由Ehrlich等[18]提出的一种模型，是为了解决能源和环境问题的一种计算方法。后来随着研究对象的越来越复杂，IPAT模型中的人口规模、富裕程度和技术水平3个因素已经不能满足人们的研究，IPAT模型出现了一定的局限性，后来Dietz等[19]根据IPAT模型提出了一种扩展模型为STIRPAT模型 (Stochastic Impacts by Regression on Population Affluence and Technology)；它可以对所选取的影响因素进行添加和修改，此模型很好的弥补了IPAT模型的不足，STIRPAT模型作为一种随机回归模型[20]，该模型在很多研究领域使用，例如：灰水足迹、碳排放研究等驱动因素研究。表达式为：

$$I = aP^bA^cT^de \quad (13)$$

式中：I为环境压力；a为常数项；P为人口数；A为富裕度；T为技术水平；b、c、d为P、A、T的弹性系数；e为误差项，当a=b=c=d=e=1时，即为I=PAT模型。

为了方便计算，上式两边转换为对数形式，其表示如下：

$$\ln I = \ln a + b\ln P + c(\ln A) + d(\ln T) + \ln e \quad (14)$$

式中：经过对数化处理后，$\ln I$ 为因变量；$\ln P$ 、$\ln A$ 、$\ln T$ 为自变量；$\ln a$ 为常数项；$\ln e$ 为误差项；b、c、d为P、A、T的影响系数。

考虑到甘肃省自身的发展，从而选取对灰水足迹影响较大的影响因素。首先是人口因素，人口数量是社会发展的主要驱动力，人口数量的增加会导致水资源的使用量增多，会造成农副产品的增加；化肥的使用量相应的也会大幅增加。所以，人口数量是灰水足迹的驱动因素[21]。产品与服务交易造成的灰水足迹也是水足迹增加的关键因素[22]，农村的消费水平与城镇消费水平差距很大，城镇的消费利用了很多的公共资源，GDP的占比也较大，水资源的消耗也很多；所以城镇化水平也是灰水足迹的驱动因素之一。人均GDP作为社会经济发展的主要参考指标，经济水平发展越高，环境压力也越大[23]，人均GDP也是灰水足迹变化的驱动因素。选取第一、二、三产业产值作为影响灰水足迹的因子。

2.9 数据来源

计算所需的污水排放量、污染物排放量、水资源量、经济数据(表1)来自2011—2020年《甘肃省统计年鉴》，畜禽排泄粪便污染物进入水体流失率(表2)采用《全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策》[24]，氮肥淋失率参考《第一次全国污染源普查—农业污染源肥料流失系数手册》[25]确定为34%。水体中污染物浓度标准采用《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)中Ⅲ类水质标准，其中COD、氨氮、TN的浓度标准分别为20 mg·L^{-1}、10 mg·L^{-1}、1 mg·L^{-1}。规定污染物的自然本底浓度为0。

3 结果与分析

3.1 甘肃省灰水足迹分析

3.1.1 甘肃省灰水足迹变化 由图1可知，灰水足迹从2011—2020年整体出现下降趋势，下降了

表1 2011—2020年甘肃省污水排放量、污染物排放量、水资源量、经济数据

Tab. 1 Wastewater discharge, pollutant discharge, water resources, and economic data in Gansu Province from 2011 to 2020

年份	污水排放量/10^4 t		污染物排放量/10^4 t			水资源量/10^8 m^3	GDP/10^8元
	生活污水	工业污水	生活COD	工业COD	总氮		
2011	59477	10218	10	0.45	3.6	410.88	9016.7
2012	59718	10409	11.23	0.87	1.28	325.88	8718.3
2013	59478	10539	11.35	0.96	1.37	354.89	8104.1
2014	54003	10426	11.31	1.39	1.35	280.79	7336.7
2015	53283	13022	13.82	1.74	1.59	209.56	6907.9
2016	48275	18760	14.66	8.36	5.13	198.81	6556.6
2017	46209	19742	14.41	8.86	5.12	230.84	6518.4
2018	44769	20171	14.54	9.05	4.74	303.209	6014.5
2019	43589	19188	14.99	9.3	4.75	300.69	5393.1
2020	39491	19720	15.23	9.61	5.19	272.14	4816.9
均值	50829.20	15219.50	13.15	5.07	3.41	288.77	6938.32

表2 畜禽粪便污染物进入水体流失率

Tab. 2 Rate of loss of livestock and poultry manure pollutants into water bodies /%

项目	牛粪	猪粪	羊粪	家禽粪	牛猪尿
COD	6.16	5.58	5.50	8.59	50
BOD	4.87	6.14	6.70	6.78	50
NH_3-N	2.22	3.04	4.10	4.15	50
TP	5.50	5.25	5.20	8.42	50
TN	5.68	5.34	5.30	8.47	50

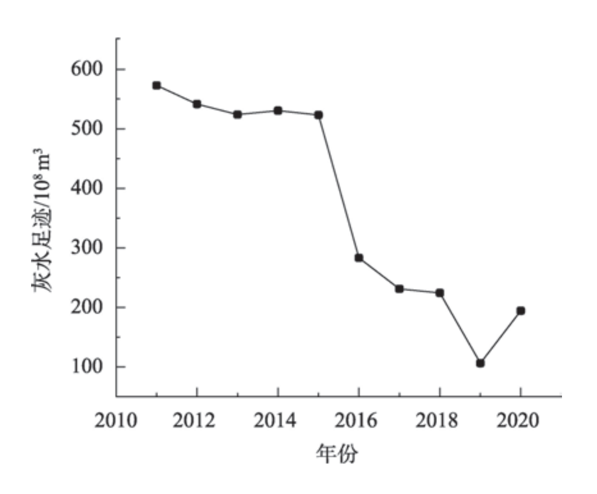


图1 2011—2020年甘肃省灰水足迹变化

Fig. 1 Changes in the footprint of gray water in Gansu Province from 2011 to 2020

378.53×10^8 m^3;最大为2011年的572.75×10^8 m^3,最小为2019年的106.14×10^8 m^3,降幅为81%。10 a的平均灰水足迹为373.05×10^8 m^3;2011—2015年下降趋势较平缓,2015—2020年下降趋势比较陡。人均灰水足迹(图2)变化与灰水足迹变化是一致的,平均

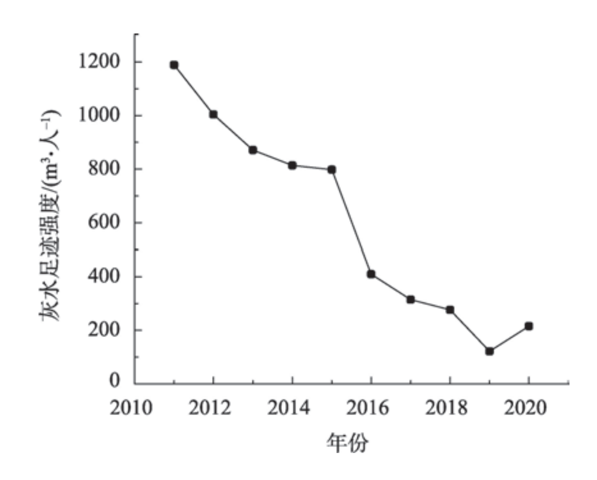


图2 2011—2020年甘肃省人均灰水足迹变化

Fig. 2 Changes in per capita grey water footprint in Gansu Province from 2011 to 2020

每年人均灰水足迹为1473.28 m^3。从两者总的灰水足迹和人均灰水足迹变化的趋势以及根据我国经济和社区经济发展五年计划来看,从2011年甘肃省实施水利经济发展十二五规划,已经开始注重环境问题,减少了污水的任意排放。至十三五规划为快速下降阶段,在此阶段,国家出台了一系列相关的文件,并且对水利发展机制的改革,促进节水型社会、伴随着环境污染治理资金投入的增加和生态文明建设的推动,使得污染得到了有效的处理,水生态保护意识的提高,是整个灰水足迹下降的重要原因。

从灰水足迹的结构(图3)来看,2011—2020年农业灰水足迹占38%,生活灰水足迹占43%;工业灰水足迹占19%。除了2014年、2015年、2020年农业

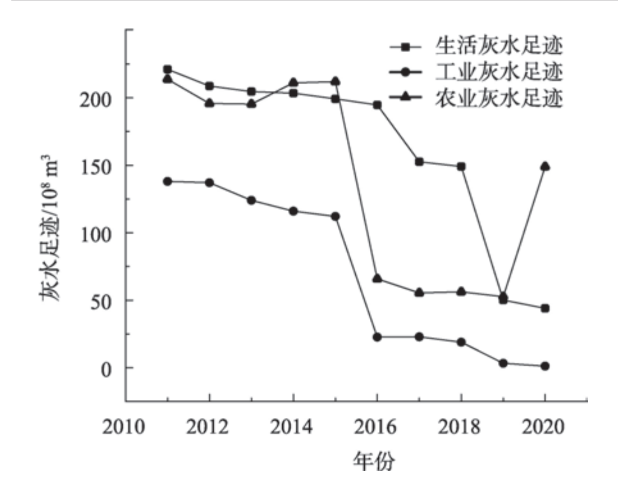


图3 2011—2020年甘肃省灰水足迹结构

Fig. 3 Structure of water footprint in Gansu Province from 2011 to 2020

灰水足迹大于生活灰水足迹；其余均是生活灰水足迹最大，呈现下跌-上升-下跌-上升的趋势。也解释了2020年总的灰水足迹上升趋势主要是农业灰水足迹的大幅度升高造成的。种植业灰水足迹一直大于畜牧业灰水足迹，表明甘肃省农业经济发展主要靠种植业。农业灰水足迹趋势在降低，相应的化肥使用量在降低。生活灰水足迹一直呈现下滑趋势，表明人们的环保意识逐渐提高；生活污水的排放量逐渐减少以及污水处理技术提升。工业灰水足迹趋势也在下降，原因是工业生产技术和生产方式的提高，污染性企业得到了整改与转型，使得工业污染源减少。

3.1.2 灰水足迹强度 2011—2019年甘肃省灰水足迹强度（图4）在下降，2019—2020年小幅度上升。

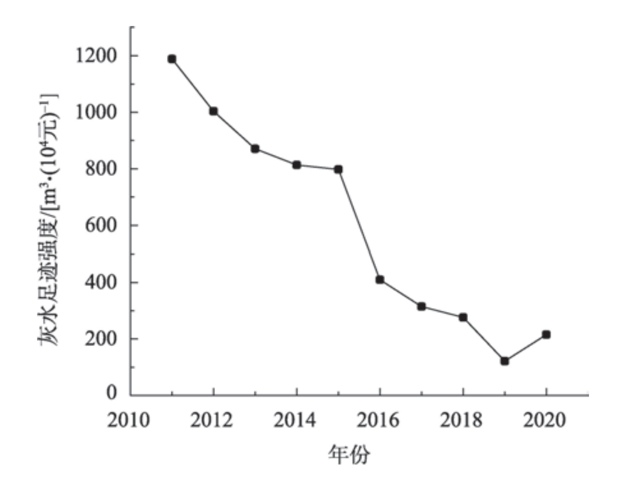


图4 2011—2020年甘肃省灰水足迹强度变化

Fig. 4 Variation of grey water footprint intensity in Gansu Province from 2011 to 2020

从灰水足迹强度的计算公式能够看出，灰水足迹与GDP的比值大小影响着水资源效率的大小。两者的比值越小，表明单位产值对水环境污染的代价越小，水资源的利用效率也越高。从2011年的1004 $m^3\cdot(10^4元)^{-1}$下降到2020年的215 $m^3\cdot(10^4元)^{-1}$，降幅为79%。第一个原因是工业生产灰水足迹不断降低，而工业生产产值比农业产值大；农业灰水足迹下降趋势并不是很平稳，2020年还在提升；农业生产产值不仅较低，而且产生的灰水足迹较大，使得农业灰水足迹强度降低迟缓。第二个原因是产业布局的调整，环境污染物排放量的降低和污水处理技术的提升。

3.1.3 水污染程度和剩余灰水足迹 由图5可以看出，2011—2016年甘肃省水污染水平均大于1，说明此期间水污染程度较严重，水生态压力较大。2015年达到最大值为2.6。其原因是水资源量较少，而生活污水逐年增加。

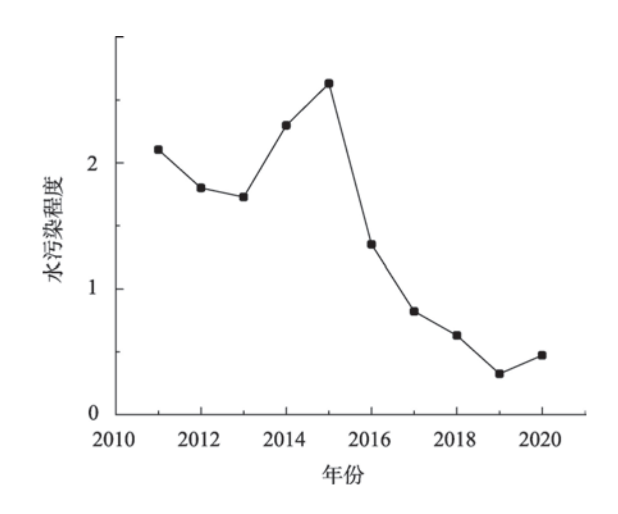


图5 2011—2020年甘肃省水污染变化程度

Fig. 5 Changes in water pollution in Gansu Province from 2011 to 2020

从图6中可以看出，甘肃省2017年以前剩余灰水足迹大于0，即每年有限的水资源量不能将排放到水体中的污染物彻底稀释到国家排放标准，从2011—2013年水质呈现上升的趋势，2013—2015年水质出现下降趋势。2015年至今水质呈现上升的趋势，水环境问题有所好转，水资源持续性增加。

3.2 灰水足迹驱动因子分析

3.2.1 SPSS多元线性拟合分析 人口、城镇化水平、人均GDP、第一、二、三产业产值、灰水足迹强度和社会消费品零售总额分别用X_1、X_2、X_3、X_4、X_5、X_6、X_7、

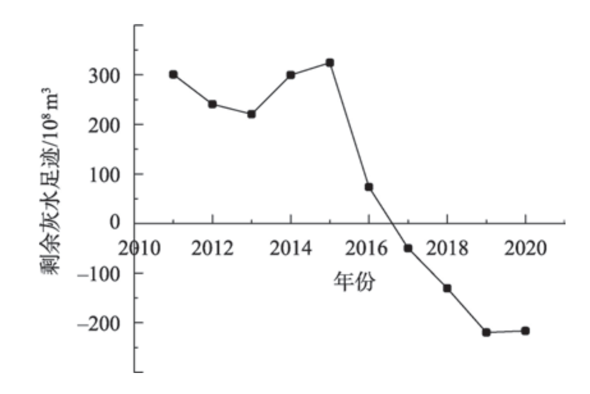


图6 2011—2020年甘肃省剩余灰水足迹变化

Fig. 6 Changes in the footprint of remaining gray water in Gansu Province from 2011 to 2020

X_8表示,灰水足迹用Y表示(表3),将数据进行对数处理,ln$Y$作为因变量,lnX_1、lnX_2、lnX_3、lnX_4、lnX_5、lnX_6、lnX_7、lnX_8作为自变量,运用SPSS进行多元线性拟合,结果如表4所示。得出调整后的R^2=0.997,说明影响因素99.7%的决定因变量ln$Y$的变化,具有较好的拟合优度,其中lnX_1不显著,作为排除变量。

表3 变量描述

Tab. 3 Variable descriptions

变量名称	计算方法	符号
灰水足迹/10^8 m^3	各年灰水足迹	Y
人口/10^4人	各年人口数量	X_1
城镇化水平/%	城镇人口占总人口比例	X_2
人均GDP/(元·人$^{-1}$)	各年人均GDP	X_3
第一产业产值/10^8元	提供生产物资材料的产业	X_4
第二产业产值/10^8元	加工、制造产业	X_5
第三产业产值/10^8元	商业、餐饮业、金融保险业等非物质生产部门	X_6
灰水足迹强度/[m^3·(10^4元)$^{-1}$]	水资源效率变化状况	X_7
社会消费品零售总额/10^4元	指城乡居民用于生活消费的商品金额	X_8

其中lnX_2、lnX_3、lnX_4、lnX_5、lnX_6、lnX_7、lnX_8的显著性sig值均大于0.05,对ln$Y$影响不显著。这是因为自变量的VIF值均比较大,根据线性拟合分析原理VIF > 10,则变量之间有着多重共线性问题,因此上述所研究的变量间存在严重的多重共线性问题。

3.2.2 岭回归分析 为了解决自变量之间的多重共线性问题,采用岭回归的方法来消除变量间的共线性问题,是一种改进的最小二乘法[26]。运用SPSSAU软件对数据进行岭回归分析[27]。由图7可知,当K值为0.01时,此时自变量的标准化回归系数趋于稳定,最佳K值取为0.01。从表5得到,模型R^2为0.999,意味着lnX_2、lnX_3、lnX_4、lnX_5、lnX_6、lnX_7、lnX_8可以解释ln$Y$的99.87%变化原因。

岭回归ANOVA检验其本质也是一种F检验,是判断所做的模型是否有实际意义。如果P值(sig值)小于0.05,说明所研究的模型是有意义的,从表6中可以看出,本文研究的P值是小于0.05的,说明模型是有意义的。

对模型进行F检验时发现,模型通过F检验(F=217.867,P=0.005<0.05),说明lnX_2、lnX_3、lnX_4、lnX_5、lnX_6、lnX_7、lnX_8中至少一项会对ln$Y$产生影响。

从表7中检验模拟的方差可知,F=217.867,Sig$F$ < 0.01,故在显著性为1%的水平下通过方差检验。自变量lnX_2、lnX_3、lnX_4、lnX_5、lnX_6、lnX_7、lnX_8的弹性系数分别为0.142、0.126、0.052、0.382、0.132、0.916、0.1,常数项为−7.829。岭回归方程为ln$Y$=−7.829 + 0.142*lnX_2 + 0.126*lnX_3 + 0.052*lnX_4 + 0.382*lnX_5+0.132*lnX_6+0.916*lnX_7+0.1*lnX_8。

3.2.3 回归结果分析 从上述模型公式中可以得出,各自变量lnX_2(城镇化水平)、lnX_3(人均GDP)、

表4 最小二乘法回归系数

Tab. 4 Least squares regression coefficients

模型	非标准化系数		标准化系数	t	Sig	共线性	
	弹性系数B	标准误差	试用版			容差	VIF
变量	−14.697	42.908		−0.343	0.765		
lnX_2	−3.412	5.912	−0.092	−0.577	0.622	0.006	161.101
lnX_3	4.427	1.880	2.100	2.354	0.143	0.000	5092.938
lnX_4	−.580	0.699	−0.494	−0.830	0.494	0.000	2265.950
lnX_5	1.901	0.540	0.504	3.519	0.072	0.008	131.477
lnX_6	6.131	1.518	3.811	4.039	0.056	0.000	5696.821
lnX_7	5.417	0.953	2.450	5.682	0.030	0.001	1190.048
lnX_8	−0.081	0.027	−0.253	−3.016	0.095	0.022	44.982

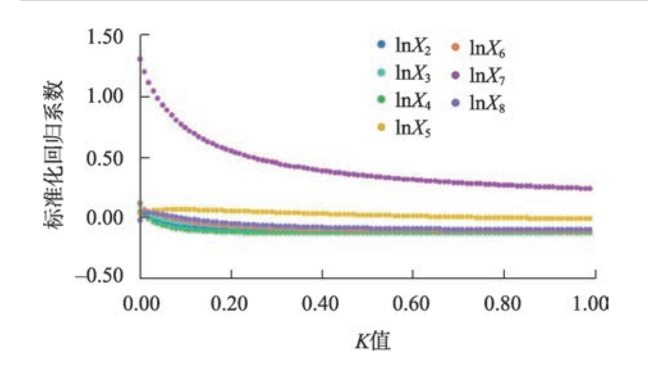


图7 岭迹图

Fig. 7 Ridge trace map

表5 岭回归模型汇总

Tab. 5 Summary of ridge regression models

模型汇总			
样本量	R^2	调整R^2	模型误差RMSE
10	0.999	0.994	0.02

表6 岭回归模型ANOVA表格

Tab. 6 Ridge regression model ANOVA table

ANOVA表格					
	平方和	*df*	均方	*F*	*P*值
回归	3.063	7	0.438	217.867	0.005
残差	0.004	2	0.002		
总计	3.067	9			

$\ln X_4$(第一产业产值)、$\ln X_5$(第二产业产值)、$\ln X_6$(第三产业产值)、$\ln X_7$(灰水足迹强度)、$\ln X_8$(社会消费品零售总额)均会促进应变量$\ln Y$(灰水足迹)的增加。根据以上模型的弹性系数可知,每个自变量增加1%均会促使应变量灰水足迹增加0.142%、0.126%、0.052%、0.382%、0.132%、0.916%、0.1%。灰水足迹强度的影响对灰水足迹影响最大,第二产业产值次之;社会消费品零售总额增加作用最弱。从三大产业产值影响系数来看,第二产业产值对灰水足迹的影响最大;从侧面看出工业部门的发展对灰水足迹的影响效率最大,农业和服务业次之。随着城镇化水平的加快、三大产业产值的发展和提高是甘肃省灰水足迹的主要影响因素。根据弹性系数的大小,可以去制定相关的政策,减少甘肃省的灰水足迹,从而减轻水环境压力[28]。

4 结 论

灰水足迹从2011—2020年整体出现下降趋势,2020年较2019年有上升的趋势,但总体而言,下降了378.53×10^8 m^3;人均灰水足迹变化与灰水足迹变化基本一致,平均每年人均灰水足迹为1473.28 m^3。生活污染是甘肃省的首要环境污染源,农业污染其次;灰水足迹的整体下降,表明污染得到了有效的控制,水生态环境质量得到了改善。

灰水足迹强度从2011年的1004 $m^3\cdot(10^4元)^{-1}$下降到2020年的215 $m^3\cdot(10^4元)^{-1}$,降幅为79%,水资源利用效率提高,其中农业灰水足迹强度降低缓慢。2011—2016年甘肃省水污染水平均大于1,表明此时间段水污染程度较严重。2013年开始剩余灰水足迹出现下降趋势,2017年为负;表明水质呈现上升趋势,水环境问题有所好转,水资源持续性增加。

从甘肃灰水足迹的驱动因素来看,随着甘肃省的经济发展和城镇化水平加快,三大产业产值对甘肃省灰水足迹的增减起主要作用,其中主要是第二产业产值及工业部门的发展影响为主。根据以上结论提出以下建议:(1)结合甘肃省地理特点和优势,推广绿色和特色农业发展。在对化肥的施用量

表7 Ridge回归分析结果

Tab. 7 Ridge regression analysis results

	非标准化系数		标准化系数	*t*	*P*	R^2	调整R^2	*F*
	B	标准误	Beta					
常数	−7.829	2.812	–	−2.784	0.108			
$\ln X_2$	0.142	0.385	0.028	0.37	0.747			
$\ln X_3$	0.126	0.096	0.045	1.34	0.322			
$\ln X_4$	0.052	0.215	0.023	0.243	0.83	0.999	0.994	$F(7,2)=217.867$ Sig $F=0.005$
$\ln X_5$	0.382	0.283	0.049	1.348	0.31			
$\ln X_6$	0.132	0.088	0.07	1.506	0.271			
$\ln X_7$	0.916	0.051	1.203	17.974	0.003**			
$\ln X_8$	0.1	0.215	0.042	0.464	0.688			

上进行严格控制。(2) 对工业部门严格控制污水的排放量,加大环境监管力度。(3) 提高城镇生活污水的处理能力,推进城镇节水降损,加强节水监督管理。(4) STIRPAT模型可以从多个方面来评价灰水足迹,能直观地看出影响灰水足迹的主要因子;从而为减少区域的灰水足迹提供了很大的帮助。

参考文献(References):

[1] 沈满洪, 陈庆能. 水资源经济学[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2008. [Shen Manhong, Chen Qingneng. Water Economics[M]. Beijing: China Environmental Press, 2008.]

[2] 王雅, 冼超凡, 欧阳志云. 基于灰水足迹的中国城市水资源可持续利用综合评价[J]. 生态学报, 2021, 41(8): 2983–2995. [Wang Ya, Xian Chaofan, Ouyang Zhiyun. Integrated assessment of sustainability in urban water resources utilization in China based on grey water footprint[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(8): 2983–2995.]

[3] 许程程. 甘肃省水资源承载力评价研究[D]. 兰州:兰州财经大学, 2021. [Xu Chengcheng. Research on Evaluation of Water Resources Carrying Capacity in Gansu Province[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Finance and Economics, 2021.]

[4] 李向, 管涛, 徐清. 基于BP神经网络的土壤重金属污染评价方法——以包头土壤环境质量评价为例[J]. 中国农学通报, 2012, 28(2): 250–256. [Li Xiang, Guan Tao, Xu Qing. The evaluation of soil heavy metal pollution based on the BP neural network: Taking soil environmental quality assessment in Baotou as an example[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(2): 250–256.]

[5] 景朝霞, 夏军, 张翔, 等. 汉江中下游干流水质状况时空分布特征及变化规律[J]. 环境科学研究, 2019, 32(1): 104–115. [Jing Zhaoxia, Xia Jun, Zhang Xiang, et al. Spatial and temporal distribution and variation of water quality in the middle and downstream of Hanjiang River[J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 104–115.]

[6] 吴钢, 蔡井伟, 付海威, 等. 模糊综合评价在大伙房水库下游水污染风险评价中应用[J]. 环境科学, 2007, 11(3): 2438–2441. [Wu Gang, Cai Jingwei, Fu Haiwei, et al. Application of fuzzy comprehensive assessment in risk assessment of water pollution conditions in downriver area of Dahuofang Reservoir[J]. Environmental Science, 2007, 11(3): 2438–2441.]

[7] 曾昭, 刘俊国. 北京市灰水足迹评价[J]. 自然资源学报, 2013, 28(7): 1169–1178. [Zeng Zhao, Liu Junguo. Historical trend of grey water footprint of Beijing, China[J]. Journal of Natural Resources, 2013, 28(7): 1169–1178.]

[8] 申浩, 陈致君, 刘健, 等. 山东省灰水足迹区域均衡性分析[J]. 节水灌溉, 2022(3): 1–7. [Sheng Hao, Chen Zhiqun, Liu Jian, et al. Analysis of the regional equilibrium of grey water footprint in Shandong Province[J]. Water Saving Irrigation, 2022(3): 1–7.]

[9] Hoekstra A Y, Chapagain A K. Globalization of Water: Sharing the Planet' s Freshwater Resources[M]. Oxford: Wiley- Blackwell, 2008.

[10] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard [M]. London: Earthscan, 2011:30- 40.

[11] 傅春, 陈毓迪, 刘业忠, 等. 江西省农田灰水足迹时空分析[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(7): 1501–1508. [Fu Chun, Chen Yudi, Liu Yezhong, et al. Temporal and spatial analysis of grey water footprint in Jiangxi Province farmland[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2022, 41(7): 1501–1508.]

[12] 罗勇. 赣江流域灰水足迹时空演变特征研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021. [Luo Yong. Study on the Temporal and Spatial Evolution Characteristics of Grey Water Footprint in Ganjiang River Basin [D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.]

[13] 贺志文, 向平安. 湖南省灰水足迹变化特征及其驱动因子分析[J]. 中国农村水利水电, 2018(10): 19–26. [He Zhiwen, Xiang Pingan. An analysis of the variations and driving factors of grey water footprint in Hunan Province[J]. China Rural Water and Hydropower, 2018(10): 19–26.]

[14] 钱秀红. 杭嘉湖平原农业非点源污染的调查评价及控制对策研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2001. [Qian Xiuhong. Investigation, Evaluation and Control Countermeasures of Agricultural Non-point Source Pollution in Hangjiahu Plain[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.]

[15] 李飞, 董锁成. 西部地区畜禽养殖污染负荷与资源化路径研究[J]. 资源科学, 2011, 33(11): 2204–2211. [Li Fei, Dong Suocheng. Pollution from livestock and poultryand. its resource strategy in West China[J]. Resources Science, 2011, 33(11): 2204–2211.]

[16] 李中桂, 高利珍. 基于水足迹理论的污水处理厂评估[J]. 环境工程学报, 2017, 11(3): 1599–1604. [Li Zhonggui, Gao Lizhen. Water footprint assessment in wastewater treatment plants[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(3): 1599–1604.]

[17] 王晓萌, 黄凯, 杨顺顺, 等. 中国产业部门水足迹演变及其影响因素分析[J]. 自然资源学报, 2014, 29(12): 2114–2126. [Wang Xiaomeng, Huang Kai, Yang Shunshun, et al. Temporal variability and influencing factors of sectoral water footprint in China[J]. Journal of Natural Resources, 2014, 29(12): 2114–2126.]

[18] Ehrlich P R, Holden J P. Impact of population growth[J]. Science, 1971, 171: 1212–1217.

[19] Dietz T, Rosa E A. Rethinking the environmental impacts of population, affluence and technology[J]. Human Ecology Review, 1994, 1: 277–300.

[20] York R, Rosa E A, Dietz T. STIRPAT, IPAT and ImPACT: analytic tools for unpacking the driving forces of environmental impacts [J]. Ecological economics, 2003, 46(3): 351–365.

[21] 张郁, 张峥, 苏明涛. 基于化肥污染的黑龙江垦区粮食生产灰水足迹研究[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(7): 28–32. [Zhang Yu, Zhang Zheng, Su Mingtao. Research on grey water footprint

based on chemical fertilizer use in the grain production in Heilongjiang reclamation area[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2013, 27(7): 28−32.]

[22] Wu Bo, Zeng Weihua, Chen Honghan, et al. Grey water footprint combined with ecological network analysis for assessing regional water quality metabolism[J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 112: 3138−3151.

[23] Li Y, Lu L, Tan Y, et al. Decoupling water consumption and environmental impact on textile industry by using water footprint method: A case study in China[J]. Water, 2017, 9(2): 124.

[24] 国家环境保护总局自然生态保护司. 全国规模化畜禽养殖业污染情况调查及防治对策[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002. [Department of Natural Ecology Protection, State Environmental Protection Administration. Investigation on the Pollution Situation of National Large-scale Livestock and Poultry Breeding Industry and Countermeasures for Prevention and Control[M]. Beijing: China Environmental Press, 2002.]

[25] 全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数测算项目组. 第一次全国污染源普查水产养殖业污染源产排污系数手册[M]. 北京: 中国水产科学研究院, 2009. [National Pollution Source Census Aquaculture Industry Pollution Source Production and Discharge Coefficient Calculation Project Team. The First National Pollution Source Census Aquaculture Industry Pollution Source Production Sewage Coefficient Manual[M]. Beijing: Chinese Academy of Fishery Sciences, 2009.]

[26] 杨楠. 岭回归分析在解决多重共线性问题中的独特作用[J]. 统计与决策, 2004(3): 14−15. [Yang Nan. The unique role of ridge regression analysis in solving multicollinearity problems[J]. Statistics & Decision, 2004(3): 14−15.]

[27] 张丽丽. 基于STIRPAT模型的建筑业碳排放影响因素分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2020. [Zhang Lili. Analysis of Carbon Emission Factors in Construction Industry Based on STIRPAT Model [D]. Xi'an : Xi'an University of Architecture and Technology, 2020.]

[28] 李允洁. 杭州市灰水足迹研究[D]. 浙江: 浙江师范大学, 2017. [Li Yunjie. Research on Grey Water Footprint in Hangzhou[D]. Zhejiang : Zhejiang Normal University, 2017.]

Analysis of various characteristics and driving factors of gray water footprint in Gansu Province

YIN Mingcai, ZHU Hao, HU Yuanzhao, LI Zhenzhong, ZHANG Jishi

(School of Environmental and Municipal Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: This study examines the change in the gray water footprint in Gansu Province from 2011 to 2020 and uses the STIRPAT model to analyze the driving factors of the greywater footprint. The results show that the greywater footprint has been declining over the last ten years. The overall decrease was 378.53 billion m^3; the maximum decline was 81%. The life, agricultural, and industrial greywater footprints accounted for 43%, 38%, and 19%, respectively. The graywater footprint of the planting industry is greater than that of animal husbandry. The overall intensity of the greywater footprint shows a downward trend, indicating that water resource utilization has increased yearly. According to the degree of water pollution and residual graywater footprint, the water pollution level in the Gansu Province from 2011 to 2016 was greater than one, and the water pollution is relatively severe. The research shows that the residual ash water footprint was negative from 2017 to 2020, indicating that the water quality shows an upward trend. Water environmental problems have been improved, and water resources continue to increase. From the driving factors of greywater footprint in the Gansu Province, urbanization level; per capita GDP; first, second, and third industrial output value; the intensity of greywater footprint; and total retail sales of social consumer goods will all promote the increase of greywater footprint, and the influencing coefficients are 0.142, 0.126, 0.052, 0.382, 0.132, 0.916, and 0.1, respectively. According to the size of the impact coefficient, relevant policies can be developed to reduce the graywater footprint of the Gansu Province, reducing the pressure on the water environment.

Keywords: Gansu Province; gray water footprints; driving factor; STIRPAT model; ridge regression